

10/01 9943

PO/FR 00/01805



ES4

REC'D 02 AUG 2000
WIPO
PCT

BREVET D'INVENTION

FROD/1805

CERTIFICAT D'UTILITÉ - CERTIFICAT D'ADDITION

COPIE OFFICIELLE

DOCUMENT DE PRIORITÉ

PRÉSENTÉ OU TRANSMIS
CONFORMÉMENT À LA
RÈGLE 17.1.a) OU b)

Le Directeur général de l'Institut national de la propriété industrielle certifie que le document ci-annexé est la copie certifiée conforme d'une demande de titre de propriété industrielle déposée à l'Institut.

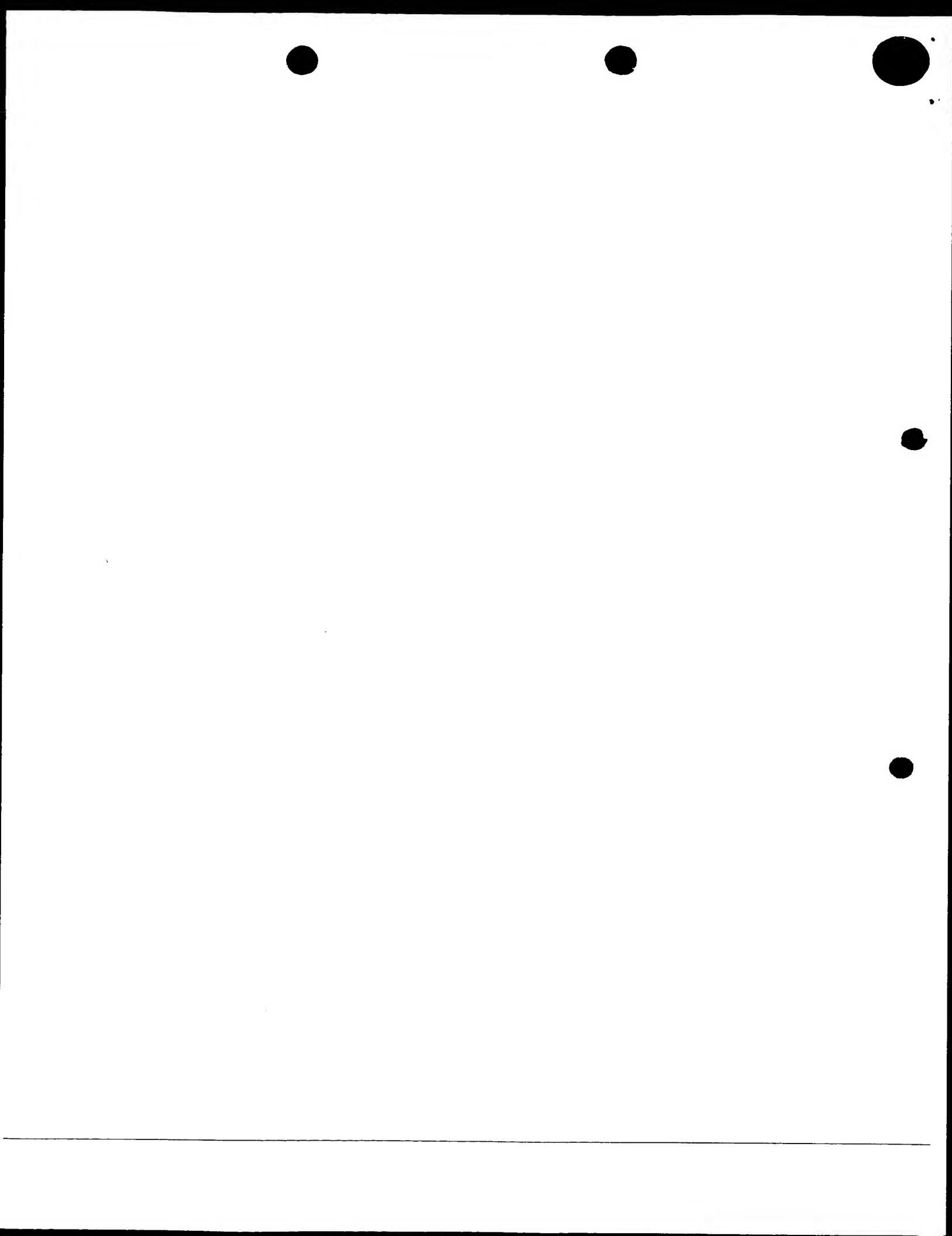
Fait à Paris, le 05 JUIL. 2000

Pour le Directeur général de l'Institut
national de la propriété industrielle
Le Chef du Département des brevets

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Martine PLANCHE'.

Martine PLANCHE

SIEGE	
INSTITUT NATIONAL DE LA PROPRIETE INDUSTRIELLE	26 bis, rue de Saint Petersbourg 75800 PARIS Cedex 08 Téléphone : 01 53 04 53 04 Télécopie : 01 42 93 59 30



DÉSIGNATION DE L'INVENTEUR

(si le demandeur n'est pas l'inventeur ou l'unique inventeur)

DEPARTEMENT DES BREVETS

26bis, rue de Saint-Pétersbourg
75800 Paris Cedex 08
Tél. : 01 53 04 53 04 - Télécopie : 01 42 93 59 30

N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL

Ag08771

TITRE DE L'INVENTION :

DISPOSITIF ET PROCEDE POUR GENERER DES VARIATIONS CONTROLEES
INTENSES ET BREVES DE PRESSION MAGNETIQUE AU SEIN D'UN
ECHANTILLON DE MATERIAU SOLIDE.

LE(S) SOUSSIGNÉ(S)

Cabinet BARRE LAFORGUE & Associés
95, rue des Amidonniers
31000 TOULOUSE

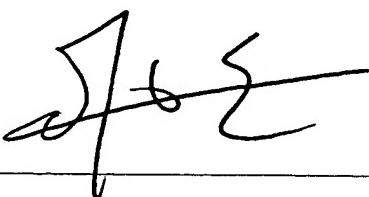
DÉSIGNE(NT) EN TANT QU'INVENTEUR(S) (indiquer nom, prénoms, adresse et souligner le nom patronymique) :

FRESCALINE Laurent
1, rue Saint-Cyr
46400 SAINT-CÉRÉ

AVRILLAUD Gilles
La Prairie
46400 ST-JEAN-LAGINESTE

NOTA : A titre exceptionnel, le nom de l'inventeur peut être suivi de celui de la société à laquelle il appartient (société d'appartenance) lorsque celle-ci est différente de la société déposante ou titulaire.

Date et signature (s) du (des) demandeur (s) ou du mandataire
Le 7 juillet 1999



**DISPOSITIF ET PROCEDE POUR GENERER DES VARIATIONS
CONTROLEES INTENSES ET BREVES DE PRESSION MAGNETIQUE
AU SEIN D'UN ECHANTILLON DE MATERIAU SOLIDE**

5 L'invention concerne un dispositif et un procédé pour générer des variations intenses et brèves, mais néanmoins prédéterminées et contrôlées, de pression magnétique –notamment d'au moins un gigapascal et pouvant aller jusqu'à cinq terapascals, en une durée pouvant être comprise entre 1ns et 500ns- au sein d'un échantillon de matériau solide.

10 L'application de telles variations intenses et brèves de pression au sein d'un matériau solide permet notamment d'en étudier le comportement et d'analyser les phénomènes divers et complexes qui peuvent intervenir lorsque ce matériau solide est soumis à des sollicitations extrêmes (changements de phase, détermination des équations d'état et des lois de comportement, dégradations, instabilités, ruptures...).

15 Les dispositifs connus permettant de générer des variations intenses et brèves au sein des matériaux solides (cf. "COMPORTEMENT DYNAMIQUE SOUS CHOC DE LA MATIERE" R. Dormeval et al, Revue Scientifique et Technique de la Direction des applications militaires, numéro 5, 20 septembre 1992, pp 77-90) consistent en des générateurs de chocs (lanceurs, explosifs, canons électromagnétiques...) ou des presses à enclume de diamant. Dans le premier cas, il est extrêmement difficile de contrôler avec précision les paramètres du profil de pression, et il n'est pas possible de générer des variations de pression isentropiques. En particulier, on connaît un canon électrique 25 comprenant une ligne plate parallèle alimentée par un générateur d'impulsions de courant électrique pour faire exploser une feuille d'aluminium découpant et projetant un disque d'isolant à haute vitesse. L'explosion de la feuille intervient essentiellement sous l'effet de l'énergie thermique résultant de la montée de l'intensité du courant, qui dure plus de 600ns et circule dans toute l'épaisseur de 30 la feuille qui est inférieure à l'épaisseur de peau. Les presses à enclume de diamant quant à elles sont des dispositifs extrêmement complexes et coûteux qui, de surcroît, présentent l'inconvénient de ne laisser que peu d'espace libre autour

de l'échantillon, de sorte que les possibilités d'analyse du comportement mécanique sont limitées.

L'invention vise donc à pallier ces inconvénients en proposant un dispositif et un procédé permettant de générer des variations intenses et brèves de pression magnétique selon une intensité et une durée prédéterminées contrôlées, la durée étant inférieure à 500ns, au sein d'un échantillon de matériau solide, et ce aussi bien avec des variations de pression magnétique qui peuvent être isentropiques qu'en régime de choc (onde de choc) contrôlé, de façon simple, peu coûteuse, tout en laissant libre l'espace autour de l'échantillon de façon à en permettre l'analyse.

L'invention vise en particulier à proposer un dispositif peu encombrant et ayant une faible consommation énergétique au regard de ses performances.

L'invention vise plus particulièrement à proposer un dispositif et un procédé générant un champ de pression sensiblement uniforme au sein de l'échantillon.

L'invention vise plus particulièrement à proposer un dispositif et un procédé permettant d'atteindre, au sein d'un échantillon de matériau solide, des variations de pression prédéterminées comprises entre 1GPa et 5TPa –notamment entre 100GPa et 1TPa- en une durée comprise entre 1ns et 500ns –notamment comprise entre 10ns et 300ns-.

L'invention vise encore plus particulièrement à proposer un dispositif tel que mentionné ci-dessus, de type électromagnétique et d'encombrement total inférieur à 100m³ –notamment de l'ordre de 1m³-, et développant une énergie dans la cellule électromagnétique inférieure à 500 kJ – notamment de l'ordre de 10kJ-.

Pour ce faire, l'invention concerne un dispositif apte à générer des variations de pression magnétique intenses et brèves, prédéterminées et contrôlées, pouvant être isentropiques, au sein d'un échantillon de matériau solide, caractérisé en ce qu'il comprend des moyens de génération d'impulsions de courant électrique du type dits à haute puissance pulsée et une cellule électromagnétique reliée aux moyens de génération d'impulsions de courant

électrique, cette cellule électromagnétique portant l'échantillon et étant adaptée pour que l'échantillon soit soumis à des impulsions d'énergie électromagnétique résultant de l'application à la cellule électromagnétique d'impulsions de courant électrique issues des moyens de génération d'impulsions de courant électrique, en 5 ce que la cellule électromagnétique comprend une ligne plate parallèle de matériau conducteur comprenant deux branches en forme de plaques planes, de mêmes formes et dimensions, séparées l'une de l'autre d'une distance inférieure ou égale à 3mm –notamment inférieure à 1mm-, dont l'une porte l'échantillon fixé rigidement sur cette branche en partie au moins sensiblement centrale; ces 10 deux branches étant reliées électriquement l'une de l'autre par une bande de jonction d'extrémité, et électriquement reliées, à l'opposé de la bande de jonction d'extrémité, aux moyens de génération d'impulsions de courant électrique, de façon à permettre l'établissement d'un courant électrique circulant depuis les moyens de génération d'impulsions de courant électrique dans une branche, puis 15 dans la bande d'extrémité, puis dans l'autre branche pour revenir aux moyens de génération d'impulsions de courant électrique, et en ce que les moyens de génération d'impulsions de courant électrique et la cellule électromagnétique sont adaptés pour que l'intensité du courant électrique circulant dans la cellule électromagnétique atteigne sa valeur maximale I_{max} en une durée τ comprise 20 entre 1ns et 500ns. Avantageusement et selon l'invention, la durée τ est comprise entre 10ns et 300ns.

Avantageusement et selon l'invention, la cellule électromagnétique est adaptée pour présenter une inductance inférieure à 4nH –notamment inférieure à 1,5nH-.

25 En outre, avantageusement et selon l'invention, les deux branches sont isolées l'une de l'autre, non pas par le vide, mais par un matériau diélectrique –notamment un matériau diélectrique solide ou un matériau diélectrique solide/liquide-.

Le matériau diélectrique doit être choisi de façon à 30 présenter une rigidité diélectrique impulsionnelle (champ électrique impulsionnel maximum qu'il peut supporter par unité d'épaisseur sans claquage) adaptée aux performances recherchées.

Avantageusement et selon l'invention, le matériau diélectrique présente une rigidité diélectrique impulsionale supérieure à 100kV/mm. En outre, avantageusement et selon l'invention, le matériau diélectrique s'étend latéralement au-delà des branches pour empêcher les 5 claquages de bordure.

Avantageusement et selon l'invention, le matériau diélectrique peut être choisi parmi un polyimide, un polyester ou un polyéthylène haute densité.

Dans l'invention, l'échantillon, dans lequel les variations de 10 pression doivent être générées, est fixé rigidement et directement sur une branche de la ligne plate parallèle formant la cellule électromagnétique. De la sorte, on peut générer en particulier des variations de pression pouvant être isentropiques intenses et brèves de caractéristiques (valeur de pression et durée) prédéterminées, de façon contrôlée, simplement et avec précision. Il est à noter 15 que ces variations de pression résultent essentiellement non pas d'un effet électromécanique ou thermique (effet Joule), mais essentiellement des forces magnétiques résultant du courant électrique établi et circulant dans la ligne avec un temps de montée suffisamment bref (de l'ordre de ou inférieur à 500ns) pour que l'énergie des forces magnétiques soit prépondérante par rapport à l'énergie 20 thermique dont l'apparition est plus lente. L'invention permet ainsi, de façon inattendue, de générer des profils de pression extrêmement intenses et brefs mais néanmoins uniformes et contrôlés dans l'échantillon et à partir d'une puissance électrique relativement faible pouvant être fournie par une source de faible coût et de faible encombrement.

Il est à noter en particulier que le choix d'une ligne plate parallèle en boucle (et non d'une structure électromagnétique coaxiale) combiné à une isolation par un matériau diélectrique (et non une isolation sous vide par isolement magnétique) permet en fait de diminuer l'espace entre les branches à une valeur très faible correspondant à une impédance de ligne également faible.

30 Avantageusement et selon l'invention, lorsque les branches sont isolées par un matériau diélectrique, la distance entre les deux branches est inférieure à 500µm. La cellule électromagnétique peut alors être adaptée pour

présenter une inductance inférieure à 1nH. Ainsi, bien que l'isolation sous vide soit a priori considérée comme meilleure et nécessaire pour les valeurs intenses de pression magnétique, et donc d'intensité de courant et de champ magnétique, puisqu'elle n'impose pas de limite de rigidité diélectrique, l'invention a mis en évidence qu'il est au contraire préférable d'opter pour une ligne plate avec une isolation par un matériau diélectrique qui permet de diminuer la valeur de l'inductance, ce qui s'avère en pratique prépondérant, malgré le fait que la rigidité diélectrique du matériau diélectrique limite les performances du dispositif.

De surcroît, le champ de pression magnétique créé est très homogène (alors qu'il varie selon le carré de la distance radiale dans une structure électromagnétique coaxiale).

En outre, avantageusement et selon l'invention, les moyens de génération d'impulsions de courant électrique comportent :

- au moins un générateur d'impulsions de courant électrique à haute puissance pulsée comprenant deux électrodes de sortie, dites première et deuxième électrodes de sortie,

- une ligne de liaison électrique comprenant une première plaque conductrice s'étendant entre la première électrode de sortie de chaque générateur et l'une des branches de la cellule électromagnétique, et une deuxième plaque conductrice s'étendant entre la deuxième électrode de sortie et l'autre branche de la cellule électromagnétique. Avantageusement et selon l'invention, les plaques de la ligne de liaison sont globalement de mêmes formes et dimensions, parallèles l'une de l'autre, superposées en regard l'une de l'autre, séparées et isolées l'une de l'autre. Avantageusement et selon l'invention, les plaques de la ligne de liaison s'étendent dans le prolongement des branches de la cellule électromagnétique. Avantageusement et selon l'invention, la ligne de liaison est adaptée pour présenter une inductance inférieure à 5nH. Une telle ligne de liaison permet aussi de minimiser l'inductance en sortie du(des) générateur(s) et d'obtenir des performances accrues.

Avantageusement et selon l'invention, la section droite transversale de la bande de jonction perpendiculairement au sens du courant électrique est plus petite que la section droite transversale cumulée des premières

ou des deuxièmes électrodes, de sorte que la densité de courant électrique atteint sa valeur maximum dans la bande de jonction. En particulier, la largeur (plus grande dimension perpendiculairement à la direction de circulation du courant électrique) de la bande de jonction est inférieure à la largeur cumulée des 5 premières électrodes ou des deuxièmes électrodes.

Avantageusement, le dispositif est caractérisé en ce que les deux branches sont rectangulaires, la bande de jonction reliant deux bords rectilignes des deux branches, et en ce que les plaques de la ligne de liaison électrique sont de forme convergente en largeur et/ou en épaisseur, de sorte que 10 la densité de courant est de valeur maximum dans les branches de la cellule électromagnétique.

Par ailleurs, avantageusement et selon l'invention, les moyens de génération d'impulsions de courant électrique comprennent au moins un éclateur multicanaux apte à répartir l'énergie électrique selon la section droite transversale –notamment selon la largeur– des branches de la cellule électromagnétique. De la sorte, on minimise encore l'inductance en sortie du(des) 15 générateur(s). Avantageusement et selon l'invention, un éclateur multicanaux est interposé entre chaque générateur et la cellule électromagnétique.

Avantageusement et selon l'invention, pour chaque 20 générateur, un éclateur multicanaux individuel est interposé entre la première électrode de sortie de ce générateur et la première plaque de la ligne de liaison. Il y a alors autant d'éclateur(s) qu'il y a de générateur(s).

Avantageusement et selon l'invention, le dispositif comprend plusieurs éclateurs en parallèle –notamment plusieurs générateurs en 25 parallèle et plusieurs éclateurs en parallèle, un pour chaque générateur–.

Dans une variante avantageuse de l'invention, le dispositif est caractérisé en ce qu'il comprend au moins un groupe de plusieurs générateurs et en ce qu'un éclateur multicanaux commun est interposé entre toutes les 30 premières électrodes des générateurs du même groupe et la première plaque de la ligne de liaison. De la sorte, la commande de commutation est simplifiée.

Par ailleurs, dans le cas notamment où les valeurs de tension électrique sont très élevées (notamment supérieures à 50kV), le dispositif

comprend, avantageusement et selon l'invention, au moins un éclateur multi-étages série, c'est-à-dire un éclateur comprenant plusieurs étages successifs en série.

Avantageusement et selon l'invention, l'échantillon est
5 placé et fixé rigidement dans un logement de la branche qui le porte.

Dans une première variante selon l'invention, le logement débouche du côté de l'espace séparant les deux branches l'une de l'autre, de sorte qu'un échantillon en matériau conducteur peut être placé dans le logement, de façon à être en liaison électrique avec la branche qui le porte, cet échantillon
10 ayant une face au contact de l'espace séparant les deux branches l'une de l'autre –notamment au contact du matériau diélectrique–.

Dans une deuxième variante selon l'invention, le logement présente un fond formant une paroi conductrice apte à séparer un échantillon en matériau non conducteur ou mauvais conducteur placé dans le logement, de l'espace séparant les deux branches l'une de l'autre –notamment du matériau
15 diélectrique-. Avantageusement et selon l'invention, la paroi conductrice présente une épaisseur inférieure à celle de la branche qui la porte. La paroi conductrice est en matériau solide rigide faisant office de poussoir transmettant la poussée magnétique résultant du courant électrique circulant dans la ligne, à l'échantillon
20 dont une face est au contact de la paroi conductrice.

Avantageusement et selon l'invention, le dispositif comprend des moyens permettant d'ajuster la valeur de l'inductance de la cellule électromagnétique et/ou celle des moyens de génération d'impulsions de courant électrique. En particulier, avantageusement et selon l'invention, le dispositif
25 comprend des moyens permettant d'ajuster la distance entre les deux branches. On peut aussi interposer une inductance variable sur la ligne de liaison ou sur l'une ou l'autre des deux branches. L'ajustement de l'inductance permet de faire varier d'une part, la valeur maximum de l'intensité du courant créé dans la cellule électromagnétique sous l'effet d'une impulsion de courant, et d'autre part, le
30 temps de montée de cette intensité. En effet, on peut écrire :

$$U \approx LI_{\max}/\tau \text{ et } \tau \approx \pi/2 \sqrt{L \cdot C}$$

où τ est le temps de montée,
 U est la tension impulsionale,
 L est l'inductance vue par la tension U,
 I_{\max} est l'intensité du courant maximale atteinte sous l'effet

5 de la tension U,

C est la capacité équivalente des moyens de génération d'impulsions de courant électrique,

et L' est l'inductance équivalente totale de l'ensemble du dispositif (moyens de génération et cellule).

10 Pour obtenir un temps de montée τ de l'ordre de ou inférieur à 500ns –notamment entre 10ns et 300ns-, il suffit en pratique d'utiliser des générateurs et des éclateurs suffisamment performants. De tels générateurs et éclateurs sont connus en eux-mêmes.

15 Avantageusement et selon l'invention, le dispositif est adapté pour que la valeur maximale I_{\max} du courant électrique établi selon la durée τ dans la cellule électromagnétique soit supérieure à 1MA -notamment de l'ordre de 2 à 11MA-. La tension U est quant à elle adaptée selon l'intensité maximum recherchée I_{\max} et en fonction de l'inductance de la cellule électromagnétique, du temps de montée τ , et de la rigidité diélectrique de l'isolant.

20 Par ailleurs, avantageusement et selon l'invention, le dispositif comporte des moyens d'analyse du comportement mécanique de l'échantillon –notamment par interférométrie Doppler laser-. Ces moyens d'analyse peuvent aisément être disposés en regard du logement dans lequel l'échantillon est fixé.

25 L'invention s'étend également à un procédé pouvant être mis en œuvre avec un dispositif selon l'invention.

30 L'invention concerne ainsi un procédé pour générer des variations de pression magnétique intenses et brèves, prédéterminées et contrôlées, pouvant être isentropiques, dans un échantillon de matériau solide, caractérisé en ce qu'on fixe rigidement l'échantillon sur une branche d'une cellule électromagnétique d'un dispositif selon l'invention, et on commute les moyens de

génération d'impulsions de courant électrique de façon à entraîner dans la cellule électromagnétique l'établissement d'un courant électrique apte à générer des forces de pression magnétique au sein de l'échantillon, l'intensité maximale I_{max} du courant électrique étant atteinte en une durée τ comprise entre 1ns et 500ns
5 –notamment entre 10ns et 300ns-.

Dans un procédé selon l'invention, on adapte les caractéristiques du dispositif selon l'invention selon les caractéristiques des variations de pression magnétique que l'on souhaite créer au sein de l'échantillon.

L'invention concerne aussi un dispositif et un procédé
10 caractérisés en combinaison par tout ou partie des caractéristiques mentionnées ci-dessus ou ci-après.

D'autres buts, caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description suivante qui se réfère aux figures annexées dans lesquelles :

15 - la figure 1 est une vue schématique en perspective d'un dispositif selon un premier mode de réalisation de l'invention,

- la figure 2 est une vue schématique en coupe longitudinale du dispositif selon l'invention de la figure 1,

20 - la figure 3 est une vue schématique en perspective illustrant la connexion d'un générateur à sortie coaxiale à une cellule électromagnétique d'un dispositif selon l'invention,

25 - la figure 4 est une vue schématique en coupe longitudinale d'une cellule électromagnétique selon une variante d'un dispositif selon l'invention adaptée au cas d'un échantillon non conducteur ou mauvais conducteur,

- la figure 5 est une vue schématique de dessus d'un dispositif selon un deuxième mode de réalisation de l'invention,

30 - la figure 6 est une vue schématique en coupe longitudinale d'une cellule électromagnétique selon une variante d'un dispositif selon l'invention doté de moyens d'ajustage de l'inductance,

- la figure 7 est une vue schématique en perspective d'un dispositif selon un troisième mode de réalisation de l'invention.

Sur les figures, les échelles –notamment en épaisseur- ne sont pas respectées, et ce, à des fins d'illustration.

Le dispositif selon l'invention représenté figure 1 comprend une cellule électromagnétique 1, un ensemble de générateurs 2 d'impulsions de courant électrique à haute puissance pulsée, et, entre cet ensemble de générateurs 2 et la cellule 1, une ligne de liaison 3. La cellule électromagnétique 1 comprend une ligne plate parallèle de matériau électriquement conducteur comprenant deux branches 4, 5 en forme de plaques planes rectangulaires parallèles l'une à l'autre, superposées en regard l'une de l'autre et séparées l'une de l'autre d'une distance inférieure ou égale à 1mm par une couche d'isolant 6 formée d'un matériau diélectrique solide. Les deux branches 4, 5 sont reliées électriquement l'une à l'autre par une bande de jonction 7 qui s'étend entre les deux bords rectilignes extrêmes 8, 9 des branches 4, 5. Les deux branches 4, 5 et la bande de jonction 7 forment ainsi une ligne plate parallèle en forme générale de boucle ouverte dont la section longitudinale a globalement la forme d'une épingle à cheveux (figure 2). Dans l'exemple représenté, la bande de jonction 7 est aussi en forme de plaque perpendiculaire aux deux branches 4, 5. Il est à noter néanmoins que cette bande de jonction 7 pourrait, en variante non représentée, présenter une section courbe, par exemple demi-circulaire, ou toute autre forme.

A l'opposé de la bande de jonction 7, chacune des branches 4, 5 est électriquement reliée à l'extrémité de plaques en matériau électriquement conducteur 10, respectivement 11, formant la ligne de liaison 3, à savoir une première plaque 10 reliée aux premières électrodes 12 des générateurs 2, et une deuxième plaque 11 reliée aux deuxièmes électrodes 13 des générateurs. Une couche d'isolant 14 en matériau diélectrique solide est également interposée entre les deux plaques 10, 11 de la ligne de liaison 3. La première plaque 10 est dotée d'un éclateur 15 de surface multicanaux multi-étages permettant de réaliser la commutation. Un tel éclateur de surface est connu en lui-même (cf. "Low inductance triggered multichannel surface switch for inductive energy storage generator" B. Etlicher et al, 10th IEEE Pulsed power conference Albuquerque New Mexico, 1995 p.243). Chaque étage de l'éclateur 15 comprend une coupure 16 ménagée dans la plaque 10 selon toute sa largeur, une feuille d'isolant 17

s'étendant entre les deux bords de la plaque 10 en regard séparés par ladite coupure 16, et une électrode 18 de déclenchement en forme générale de peigne insérée au sein de l'isolant 14 sous la coupure 16. Cette électrode 18 est reliée à un déclencheur 19 apte à polariser l'électrode 18 à une tension élevée adaptée pour entraîner le claquage entre les deux bords de la coupure 16 le long de la surface de la feuille d'isolant 17, et l'établissement de plusieurs lignes de courant électrique parallèles entre les deux bords de la coupure 16, parallèlement aux dents du peigne formant l'électrode 18. Le déclencheur 19 est donc essentiellement une source de tension impulsionnelle de plusieurs dizaines de kilovolts, mais qui n'a pas à délivrer une puissance électrique importante.

Le nombre d'étages 15a, 15b de l'éclateur 15 placés en série successivement dépend notamment de la valeur de la tension électrique impulsionnelle qui doit être appliquée à la cellule électromagnétique 1 par les générateurs 2. En effet, lorsque cette valeur est trop importante, il est nécessaire de réaliser la commutation successivement d'un étage à l'autre, par des plaques intermédiaires polarisées par des tensions intermédiaires. Dans l'exemple représenté, l'éclateur 15 comprend deux étages successifs 15a, 15b, et la plaque intermédiaire 20 séparant ces deux étages est polarisée à une tension intermédiaire entre celle délivrée par la première électrode 12 et celle de la deuxième électrode 13 reliée à la masse, des générateurs 2, et ce, notamment par un pont diviseur comprenant deux résistances 21, 22 de valeurs très élevées (très supérieures à l'ensemble de la résistance de la ligne de liaison 3 et de la cellule électromagnétique 1) dont l'une 21 relie la première électrode 12 à la plaque intermédiaire 20, tandis que l'autre 22 relie la plaque intermédiaire 20 à la masse. Chaque étage 15a, 15b comprend une électrode 18a, 18b de déclenchement en forme de peigne (représentée en pointillés figure 1) reliée au déclencheur 19, comme décrit ci-dessus.

Un échantillon 23 de matériau solide est fixé rigidement à l'une 4 des branches de la cellule électromagnétique 1. Pour ce faire, cette branche 4 comprend un logement ménagé en creux pour recevoir l'échantillon 23. Ce logement, et donc l'échantillon 23, est disposé en position au moins sensiblement médiane sur la branche 4, c'est-à-dire au moins sensiblement au

milieu de sa largeur. De préférence, avantageusement et selon l'invention, le logement et l'échantillon 23 sont disposés au moins sensiblement en partie centrale de la branche 4.

Si l'échantillon 23 est en matériau conducteur, le logement qui le reçoit peut être ménagé dans toute l'épaisseur de la branche 4, c'est-à-dire jusqu'à la couche d'isolant 6, le courant électrique pouvant être véhiculé par l'échantillon 23 lui-même, comme cela est représenté dans la variante de la figure 6. Dans le cas contraire (variante de la figure 4), le logement n'est pas entièrement traversant et une paroi conductrice 24 forme un fond de logement pour séparer la couche d'isolant 6 de l'échantillon 23 et assurer le passage du courant électrique en regard de la face de l'échantillon 23 au contact du fond 24. L'épaisseur de ce fond 24 peut être extrêmement faible, et, par exemple, correspondre à l'épaisseur de peau dans laquelle le courant circule dans la branche 4.

Pour former le logement recevant l'échantillon 23 et la paroi de fond 24, il suffit de réaliser un creusement dans l'épaisseur de la branche 4, de dimensions appropriées.

L'échantillon 23 comprend une paroi de fond 25 d'épaisseur constante relativement fine (en général de quelques dixièmes de millimètres) au sein de laquelle un champ de pression magnétique va être créé lorsque le courant électrique s'établira à travers la cellule électromagnétique 1, avant la destruction de l'échantillon 23 de matériau solide. Cette paroi de fond 25 est prolongée périphériquement vers le haut et latéralement au-dessus de la branche 4, en forme de collet 26, ce collet 26 constituent une couronne qui permet la fixation de l'échantillon 23 à la branche 4 par l'intermédiaire de vis 27.

En variante non représentée, pour fixer l'échantillon 23, il est possible de prévoir une pièce distincte de l'échantillon 23 lui-même formant une couronne de fixation similaire à celle formée par le collet 26.

La cellule électromagnétique 1 présente une largeur, perpendiculairement au sens de circulation du courant électrique provenant des générateurs 2, qui est inférieure à la largeur de la ligne de liaison 3 et à la largeur cumulée des électrodes 12, 13 des générateurs 2. Plus généralement, la largeur de

la bande de jonction 7 est inférieure à la largeur cumulée des premières électrodes 12 ou à la largeur cumulée des deuxièmes électrodes 13. De la sorte, la densité de courant augmente entre les générateurs 2 et la bande de jonction 7, c'est-à-dire entre les générateurs 2 et la cellule électromagnétique 1, dans laquelle 5 la densité de courant est maximum.

Comme on le voit figure 1, les électrodes 12, 13 des générateurs 2 sont simplement placées au contact des plaques 10, 11 conductrices de la ligne de liaison 3.

Dans le cas où l'on souhaite employer un ou plusieurs 10 générateurs 2 ayant, non pas des électrodes planes, mais une sortie coaxiale, il suffit de transformer cette sortie coaxiale 28 en deux électrodes planes 29, 30 comme représenté figure 3, en conservant la valeur de l'aire de la section droite transversale des électrodes.

La configuration des générateurs 2, de la ligne de liaison 3, 15 et des moyens 15 de commutation à éclateurs, peut faire l'objet de nombreuses variantes. Ainsi, sur la figure 5, on a représenté schématiquement, vu de dessus, trois générateurs 2 associés chacun à un éclateur 15 de surface individuelle, selon trois branches parallèles de la ligne de liaison 3 qui se rejoignent les unes aux autres dans le plan pour former la cellule électromagnétique 1 portant 20 l'échantillon 23. Sur la figure 7, on a représenté un autre mode de réalisation comprenant également trois générateurs 2 associés chacun à un éclateur en volume du type dit éclateur carré 31. Chacun des trois éclateurs 31 est relié à l'une des trois branches perpendiculaires formant la ligne de liaison 3 en forme 25 générale de T. La cellule électromagnétique 1 est placée en prolongement de la jonction des trois branches de la ligne de liaison 3, dans le prolongement de la branche principale médiane du T qui est perpendiculaire aux autres. Les éclateurs carrés 31 sont des éclateurs en volume multicanaux multi-étages, et peuvent être par exemple réalisés comme décrit dans la publication "Multi gap, multi channel 30 spark switches" Kim A. A. et al, 11th IEEE Pulsed power conference Baltimore, Maryland, 1997 p. 862). Toute autre forme de réalisation d'éclateurs multicanaux peut être utilisée.

La couche d'isolant 6 séparant les deux branches 4, 5 de la cellule électromagnétique, ainsi que la couche d'isolant 14 séparant les plaques 10, 11 de la ligne de liaison 3, déborde latéralement sur le côté sur une distance suffisante, de façon à éviter tout phénomène de claquage de bord.

5 Comme on le voit figure 2, l'épaisseur de la couche d'isolant 6 de la cellule électromagnétique 1 correspondant à la distance entre les deux branches 4, 5 de la cellule électromagnétique 1, est inférieure à celle de la couche d'isolant 14 correspondant à la distance entre les deux plaques 10, 11 de la ligne de liaison 3. En effet, la distance séparant les deux branches 4, 5 de la
10 cellule électromagnétique 1 est aussi faible que possible. Dans le cas où l'on utilise une couche d'isolant 6 formée d'un matériau diélectrique solide ou solide/liquide, disposé en une ou plusieurs couche(s), cette distance peut être inférieure à $500\mu\text{m}$, par exemple de l'ordre de $100\mu\text{m}$. Une telle distance extrêmement faible a pour effet de diminuer fortement l'inductance de la cellule
15 électromagnétique 1, et donc l'énergie requise pour établir un courant d'intensité élevée en un temps de montée inférieur à 500ns –notamment inférieure à 300ns – au sein de la cellule électromagnétique 1, cette intensité élevée étant elle-même adaptée à créer un champ de pression magnétique intense au sein de l'échantillon
20 23. Il est à noter à cet égard que contrairement à ce qui est représenté, l'épaisseur de l'isolant 6 peut être inférieure à celle des branches 4, 5.

Les équations simplifiées permettant de décrire approximativement le fonctionnement d'une telle cellule électromagnétique 1 sont les suivantes.

U étant la tension purement inductive appliquée entre les
25 deux branches 4, 5, L étant l'inductance totale de la cellule électromagnétique 1, I_{\max} étant l'intensité maximale du courant électrique établi d'une cellule électromagnétique 1, τ étant le temps de montée de l'intensité électrique du courant jusqu'à la valeur I_{\max} , B étant la valeur maximale du champ magnétique, μ étant la perméabilité magnétique du milieu, e étant la distance entre les
30 branches 4, 5, E_m étant la rigidité diélectrique du matériau formant la couche d'isolant 6 (c'est-à-dire le champ électrique maximum de claquage par unité de

longueur dans le sens de l'épaisseur), ℓ étant la largeur de la cellule électromagnétique 1 supposée être égale à sa longueur, C étant la capacité équivalente des moyens de générations, et L' étant l'inductance équivalente totale de l'ensemble du dispositif (moyens de génération d'impulsions de courant électrique et cellule électromagnétique). Dans l'hypothèse où la longueur de la cellule électromagnétique est égale à sa largeur, on obtient :

$$U \approx L \cdot I_{\max} / \tau$$

$$B \approx \mu \cdot I_{\max} / \ell$$

$$L \approx \mu \cdot e$$

$$U \approx E_m \cdot e$$

$$I_{\max} \approx E_m \cdot \frac{\tau}{\mu} \approx U \cdot \tau / \mu \cdot e$$

$$\tau \approx \pi/2 \sqrt{L' \cdot C}$$

Compte tenu des équations de Maxwell, on sait que la pression magnétique qui sera engendrée au sein de l'échantillon 23 est proportionnel à I^2 , où I est l'intensité du courant électrique.

Ainsi, la pression maximale engendrée dans l'échantillon 23 sera d'autant plus grande que la rigidité diélectrique E_m de l'isolant sera forte et que l'épaisseur e entre les branches 4, 5 sera faible. Néanmoins, la tension maximum qu'il est possible d'appliquer à la cellule électromagnétique 1 est limitée par la valeur du produit de E_m par e .

Il est à noter que la rigidité diélectrique E_m du matériau considéré est la rigidité diélectrique impulsionale. En pratique, on connaît certains matériaux solides et certains matériaux formés d'un mélange solide/liquide (solide imbibé d'un liquide) qui présentent des rigidités diélectriques supérieures à 100 kV/mm en régime impulsional d'une durée de l'ordre de la microseconde, tel que le Kapton (marque enregistrée) commercialisé par la Société DUPONT DE NEMOURS. Ce matériau est un polyimide.

Mais, on peut également utiliser aussi un polyester tel que le Mylar (marque enregistrée) commercialisé également par la Société DUPONT DE NEMOURS, ou un polyéthylène haute densité.

Typiquement, les branches 4, 5 de la cellule électromagnétique 1 peuvent présenter une largeur de l'ordre de quelques millimètres, par exemple 2 à 15mm –notamment de l'ordre de 8mm-. Les branches de la cellule électromagnétique 1 et la ligne de liaison 3 peuvent être 5 réalisées par exemple en cuivre ou tout autre conducteur de grande qualité.

A titre d'exemple, si $e=0,1\text{mm}$, $E_m=200\text{kV/mm}$, $I_{max}=8.10^6\text{A}$, $\tau=100\text{ns}$, $L=0,25\text{nH}$, $U=20\text{kV}$, B est de l'ordre de 1250 Tesla pour un échantillon de 5mm de diamètre. La pression magnétique maximale générée au sein du matériau peut être de l'ordre de 6.10^{11}Pa . L'énergie inductive dans la 10 cellule électromagnétique 1 sera de l'ordre de 8 kJ.

Par ailleurs, on constate que le champ magnétique est extrêmement homogène au sein de l'échantillon 23. Il en va donc de même de l'intensité du courant électrique et du champ de pression magnétique créés.

Il est à noter, qu'en variante non représentée, la cellule 15 électromagnétique 1 peut être isolée, non pas par une couche d'isolant 6 de matériau diélectrique, mais en étant placée dans le vide par isolement magnétique. Néanmoins, cette technologie est plus lourde et complexe. En outre, l'isolement magnétique impose de respecter une certaine distance entre les branches 4, 5 qui, en pratique, est supérieure à 0,5mm. Dès lors, l'inductance de 20 la cellule électromagnétique 1 s'en trouve augmentée d'autant, ainsi que la tension inductive maximum de polarisation de la cellule électromagnétique 1, et donc l'énergie inductive devant être délivrée par les générateurs 2. En pratique, on peut néanmoins augmenter plus fortement la valeur de l'intensité maximale du courant, et donc de la pression magnétique maximale générée au sein de 25 l'échantillon 23. Typiquement, on peut atteindre aisément des valeurs de 11.10^{11}Pa avec une énergie inductive de l'ordre de 40 à 80 kJ.

Les générateurs 2 peuvent être formés de simples condensateurs tels que des condensateurs Maxwell n° 37336 ou de tout autre générateur connu à haute puissance pulsée permettant d'obtenir le temps de montée τ et la valeur de tension U et de l'intensité maximale I_{max} (avec ou sans système de formation de l'impulsion). De préférence, on utilise les générateurs 30 ayant les meilleurs rendements, le plus faible encombrement, et la plus faible

inductance. Parmi les générateurs pouvant être utilisés, on peut citer : des générateurs de Marx, des transformateurs ; des générateurs à stockage inductif ; des générateurs à stockage capacitif ; des générateurs hybrides à stockage inductif et capacitif.

5 L'échantillon 23 est par ailleurs analysé par un dispositif d'analyse 32, par exemple par interférométrie Doppler laser. Il est à noter que l'invention permet de disposer tous dispositifs d'analyse appropriés en regard de l'échantillon 23.

Dans un dispositif selon l'invention, l'inductance vue par
10 les générateurs 2 est extrêmement faible, de sorte que l'énergie inductive que ces générateurs 2 doivent produire est également faible. En conséquence, les générateurs peuvent être dimensionnés avec un faible encombrement et une faible puissance de sortie relative. Ainsi, avec des générateurs traditionnels, il est possible de générer, au sein de l'échantillon 23, des champs de pression
15 magnétique extrêmement élevés sur une durée faible mais ajustable. Ces champs de pression magnétique peuvent être des compressions avec ou sans choc, et qui peuvent être isentropiques, selon les valeurs créées. Selon la tension délivrée par les générateurs, on peut faire varier l'intensité du courant, et donc la valeur de la pression magnétique maximale, sans faire varier la durée d'application du champ
20 de pression. Si l'on fait varier la distance e entre les branches 4, 5, par exemple avec la variante de dispositif représentée figure 6, on peut alors ajuster la valeur de l'inductance L , donc celle du courant maximum I_{max} , et du temps de montée τ . Comme on le voit figure 6, la branche 4 est associée à la bande de jonction 7 par des boulons 33 qui prolongent cette branche 4, et traversent les alésages 34
25 ménagés à travers la bande de jonction 7 qui est elle-même prolongée vers le haut. Plusieurs lignes d'alésage 34 sont ménagées dans la bande de jonction 7 selon la distance que l'on souhaite donner entre les branches 4, 5. En variante, il est tout aussi possible de créer une inductance complémentaire dans la ligne de liaison 3 ou dans la cellule électromagnétique 1 en interposant des moyens
30 formant une inductance variable, par exemple un pont de hauteur réglable.

L'invention peut faire l'objet de nombreuses variantes par rapport aux modes de réalisation décrits et représentés uniquement à titre d'exemples non limitatifs.

REVENDICATIONS

1/ - Dispositif apte à générer des variations de pression magnétique intenses et brèves, prédéterminées et contrôlées, pouvant être
5 isentropiques au sein d'un échantillon (23) de matériau solide, caractérisé en ce qu'il comprend des moyens (2, 3) de génération d'impulsions de courant électrique du type dits à haute puissance pulsée et une cellule électromagnétique (1) reliée aux moyens (2, 3) de génération d'impulsions de courant électrique, cette cellule électromagnétique (1) portant l'échantillon (23) et étant adaptée pour
10 que l'échantillon (23) soit soumis à des impulsions d'énergie électromagnétique résultant de l'application à la cellule électromagnétique (1) d'impulsions de courant électrique issues des moyens (2, 3) de génération d'impulsions de courant électrique, en ce que la cellule électromagnétique (1) comprend une ligne plate parallèle de matériau conducteur comprenant deux branches (4, 5) en forme de
15 plaques planes, de mêmes formes et dimensions, séparées l'une de l'autre d'une distance inférieure ou égale à 3mm, dont l'une (4) porte l'échantillon (23) fixé rigidement sur cette branche (4), ces deux branches (4, 5) étant reliées électriquement l'une de l'autre par une bande de jonction (7) d'extrémité, et électriquement reliées, à l'opposé de la bande de jonction (7) d'extrémité, aux
20 moyens (2, 3) de génération d'impulsions de courant électrique, de façon à permettre l'établissement d'un courant électrique circulant depuis les moyens (2, 3) de génération d'impulsions de courant électrique dans une branche (4), puis dans la bande d'extrémité (7), puis dans l'autre branche (5) pour revenir aux
25 moyens (2, 3) de génération d'impulsions de courant électrique, et en ce que les moyens (2, 3) de génération d'impulsions de courant électrique et la cellule électromagnétique (1) sont adaptés pour que l'intensité du courant électrique circulant dans la cellule électromagnétique (1) atteigne sa valeur maximale I_{max} en une durée τ comprise entre 1ns et 500ns.

2/ - Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce
30 que la cellule électromagnétique (1) est adaptée pour présenter une inductance inférieure à 4nH.

3/- Dispositif selon l'une des revendications 1 ou 2, caractérisé en ce que les deux branches (4, 5) sont isolées l'une de l'autre par un matériau diélectrique (6).

4/- Dispositif selon la revendication 3, caractérisé en ce
5 que le matériau diélectrique (6) est solide ou solide/liquide.

5/- Dispositif selon l'une des revendications 3 et 4, caractérisé en ce que le matériau diélectrique (6) présente une rigidité diélectrique impulsionnelle supérieure à 100 kV/mm.

10 6/- Dispositif selon l'une des revendications 3 à 5, caractérisé en ce que le matériau diélectrique (6) s'étend latéralement au-delà des branches (4, 5) pour empêcher les claquages de bordure.

7/- Dispositif selon l'une des revendications 3 à 6, caractérisé en ce que le matériau diélectrique (6) est choisi parmi un polyimide, un polyester ou un polyéthylène haute densité.

15 8/- Dispositif selon l'une des revendications 3 à 7, caractérisé en ce que la distance entre les deux branches (4, 5) est inférieure à 500µm.

9/- Dispositif selon l'une des revendications 3 à 8, caractérisé en ce que la cellule électromagnétique (1) est adaptée pour présenter
20 une inductance inférieure à 1nH.

10/- Dispositif selon l'une des revendications 1 à 9, caractérisé en ce que les moyens (2, 3) de génération d'impulsions de courant électrique comportent :

25 - au moins un générateur (2) d'impulsions de courant électrique à haute puissance pulsée comprenant deux électrodes (12, 13) de sortie, dites première (12) et deuxième (13) électrodes de sortie,

30 - une ligne de liaison (3) électrique comprenant une première plaque (10) conductrice s'étendant entre la première électrode (12) de sortie de chaque générateur (2) et l'une (4) des branches de la cellule électromagnétique (1), et une deuxième plaque (11) conductrice s'étendant entre la deuxième électrode (13) de sortie et l'autre (5) branche de la cellule électromagnétique (1).

11/ - Dispositif selon la revendication 10, caractérisé en ce que la section droite transversale de la bande de jonction (7) perpendiculairement au sens du courant électrique est plus petite que la section droite transversale cumulée des premières (12) ou des deuxièmes (13) électrodes, de sorte que la 5 densité de courant électrique atteint sa valeur maximum dans la bande de jonction (7).

12/ - Dispositif selon la revendication 11, caractérisé en ce que la largeur de la bande de jonction (7) est inférieure à la largeur cumulée des premières électrodes (12) ou des deuxièmes électrodes (13).

10 13/ - Dispositif selon l'une des revendications 11 et 12, caractérisé en ce que les deux branches (4, 5) sont rectangulaires, la bande de jonction (7) reliant deux bords rectilignes (8, 9) des deux branches (4, 5), et en ce que les plaques (10, 11) de la ligne de liaison (3) électrique sont de forme convergente en largeur et/ou en épaisseur, de sorte que la densité de courant est 15 de valeur maximum dans les branches (4, 5) de la cellule électromagnétique (1).

14/ - Dispositif selon l'une des revendications 10 à 13, caractérisé en ce que les plaques (10, 11) de la ligne de liaison (3) sont globalement de mêmes formes et dimensions, parallèles l'une de l'autre, superposées en regard l'une de l'autre, séparées et isolées l'une de l'autre.

20 15/ - Dispositif selon l'une des revendications 10 à 14, caractérisé en ce que les plaques (10, 11) de la ligne de liaison (3) s'étendent dans le prolongement des branches (4, 5) de la cellule électromagnétique (1).

25 16/ - Dispositif selon l'une des revendications 10 à 15, caractérisé en ce que la ligne de liaison (3) est adaptée pour présenter une inductance inférieure à 5nH.

17/ - Dispositif selon l'une des revendications 1 à 16, caractérisé en ce que les moyens (2, 3) de génération d'impulsions de courant électrique comprennent au moins un éclateur (15, 31) multicanaux apte à répartir l'énergie électrique selon la section droite transversale des branches (4, 5) de la 30 cellule électromagnétique (1).

18/ - Dispositif selon les revendications 10 et 17, caractérisé en ce qu'un éclateur multicanaux (15, 31) est interposé entre chaque générateur (2) et la cellule électromagnétique (1).

19/ - Dispositif selon la revendication 18, caractérisé en ce que pour chaque générateur (2), un éclateur multicanaux (15, 31) individuel est interposé entre la première électrode (12) de sortie de ce générateur (2) et la première plaque (10) de la ligne de liaison (3).

20/ - Dispositif selon l'une des revendications 17 à 19, caractérisé en ce qu'il comprend au moins un groupe de plusieurs générateurs (2) et en ce qu'un éclateur multicanaux (15) commun est interposé entre toutes les premières électrodes (12) des générateurs (2) du même groupe et la première plaque (10) de la ligne de liaison (3).

21/ - Dispositif selon l'une des revendications 17 à 20, caractérisé en ce qu'il comprend au moins un éclateur (15, 31) multi-étages série.

22/ - Dispositif selon l'une des revendications 17 à 21, caractérisé en ce qu'il comprend plusieurs éclateurs (15, 31) en parallèle.

23/ - Dispositif selon l'une des revendications 1 à 22, caractérisé en ce que l'échantillon (23) est placé et fixé rigidement dans un logement de la branche (4) qui le porte.

24/ - Dispositif selon la revendication 23, caractérisé en ce que le logement débouche du côté de l'espace séparant les deux branches (4, 5) l'une de l'autre, de sorte qu'un échantillon (23) en matériau conducteur peut être placé dans le logement, de façon à être en liaison électrique avec la branche (4) qui le porte, cet échantillon (23) ayant une face au contact de l'espace séparant les deux branches (4, 5) l'une de l'autre –notamment au contact du matériau diélectrique (6)-.

25/ - Dispositif selon la revendication 23, caractérisé en ce que le logement présente un fond (24) formant une paroi conductrice apte à séparer un échantillon (23) ou matériau non conducteur ou en matériau mauvais conducteur placé dans le logement, de l'espace séparant les deux branches (4, 5) l'une de l'autre –notamment du matériau diélectrique (6)-.

26/ - Dispositif selon la revendication 25, caractérisé en ce que la paroi conductrice (2, 4) présente une épaisseur inférieure à celle de la branche (4) qui la porte.

27/ - Dispositif selon l'une des revendications 1 à 26,
5 caractérisé en ce qu'il comprend des moyens (33, 34) permettant d'ajuster la valeur de l'inductance de la cellule électromagnétique (1) et/ou des moyens (2, 3) de génération d'impulsions de courant électrique.

28/ - Dispositif selon l'une des revendications 1 à 27,
caractérisé en ce qu'il comprend des moyens (33, 34) permettant d'ajuster la
10 distance (e) entre les deux branches (4, 5).

29/ - Dispositif selon l'une des revendications 1 à 28,
caractérisé en ce qu'il comporte des moyens (32) d'analyse du comportement mécanique de l'échantillon (23) –notamment par interférométrie Doppler laser–.

30/ - Procédé pour générer des variations de pression
15 magnétique intenses et brèves, prédéterminées et contrôlées, pouvant être isentropiques dans un échantillon (23) de matériau solide, caractérisé en ce qu'on fixe rigidement l'échantillon (23) sur une branche (4) d'une cellule électromagnétique (1) d'un dispositif selon l'une des revendications 1 à 29, et on commute les moyens (2, 3) de génération d'impulsions de courant électrique de
20 façon à entraîner dans la cellule électromagnétique (1) l'établissement d'un courant électrique apte à générer des forces de pression magnétiques au sein de l'échantillon (23), l'intensité maximale I_{max} du courant électrique étant atteinte en une durée τ comprise entre 1ns et 500ns.

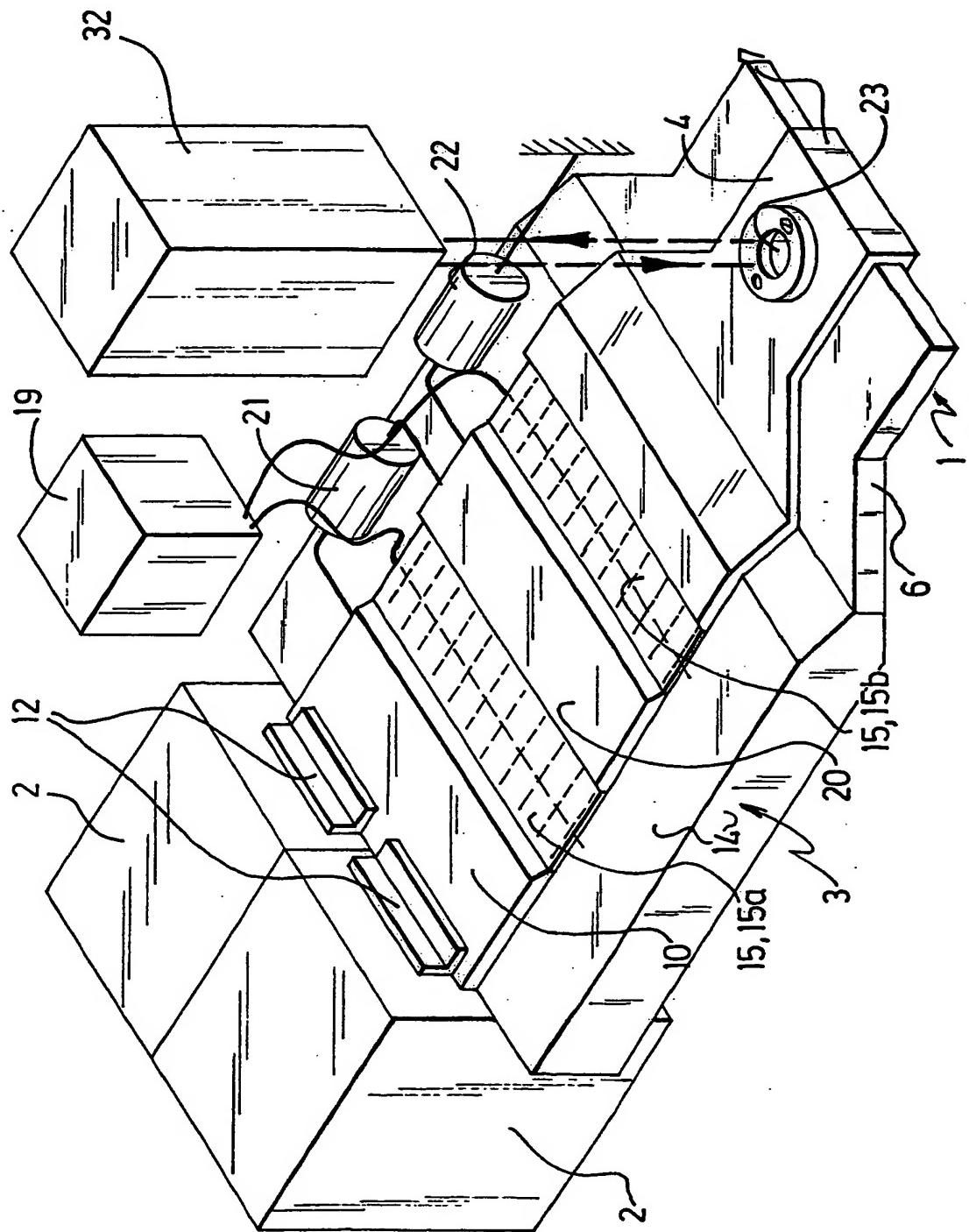
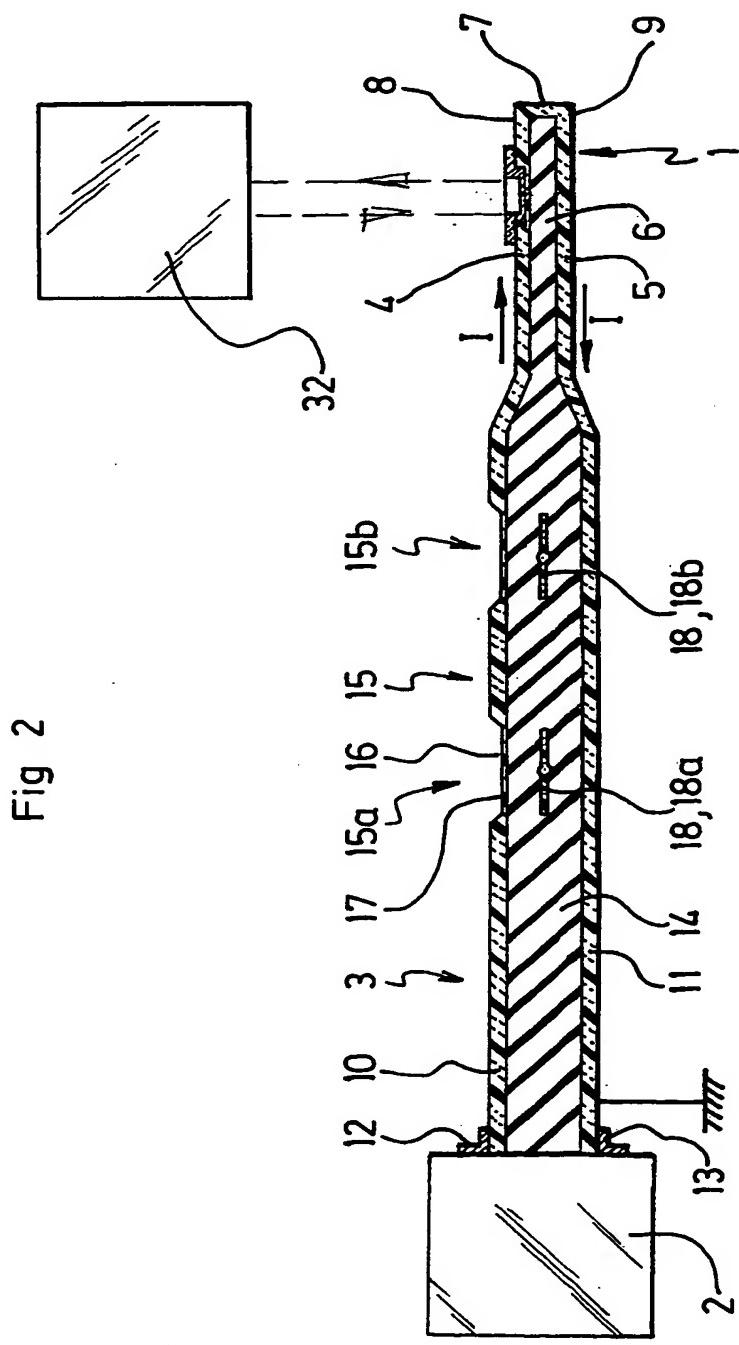


Fig. 1



3/5

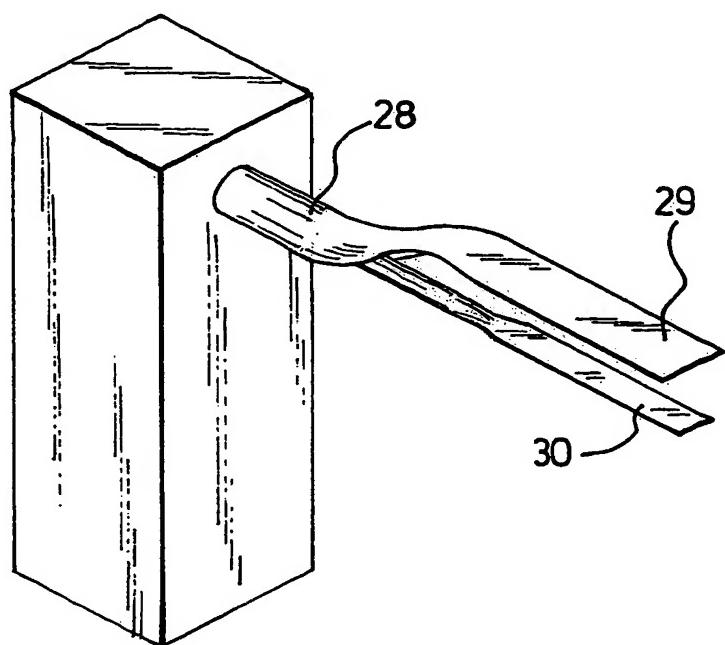


Fig. 3

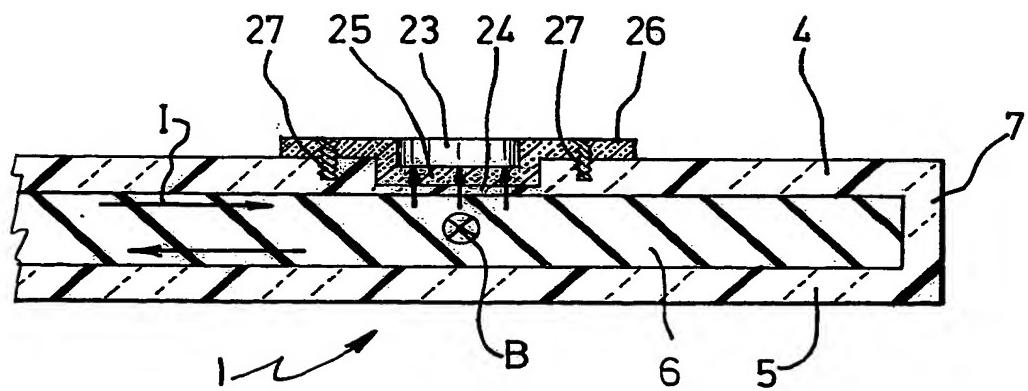


Fig. 4

4/5

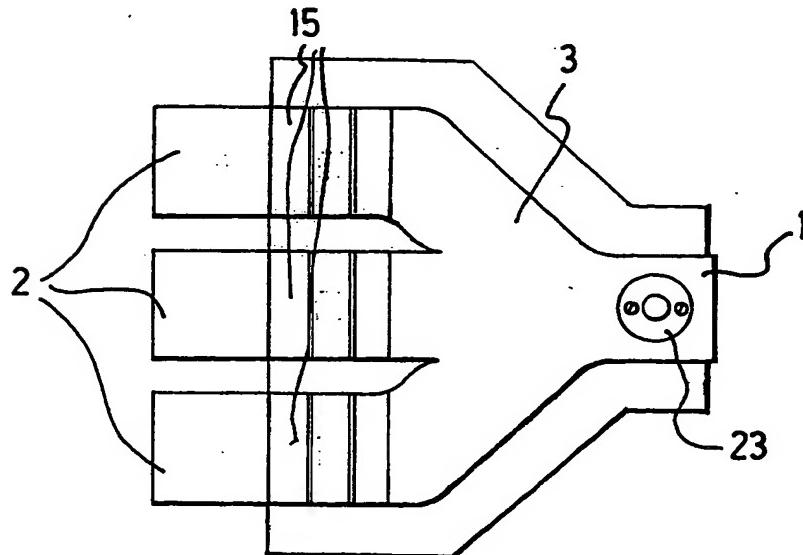


Fig. 5

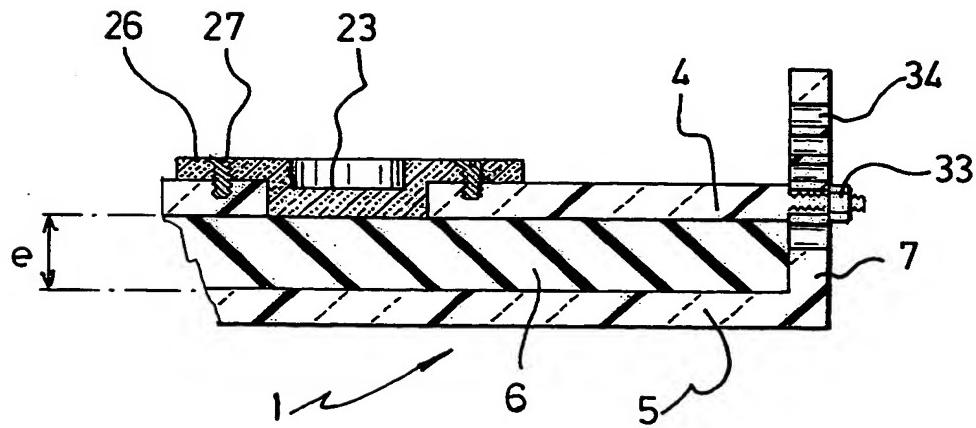


Fig. 6

5/5

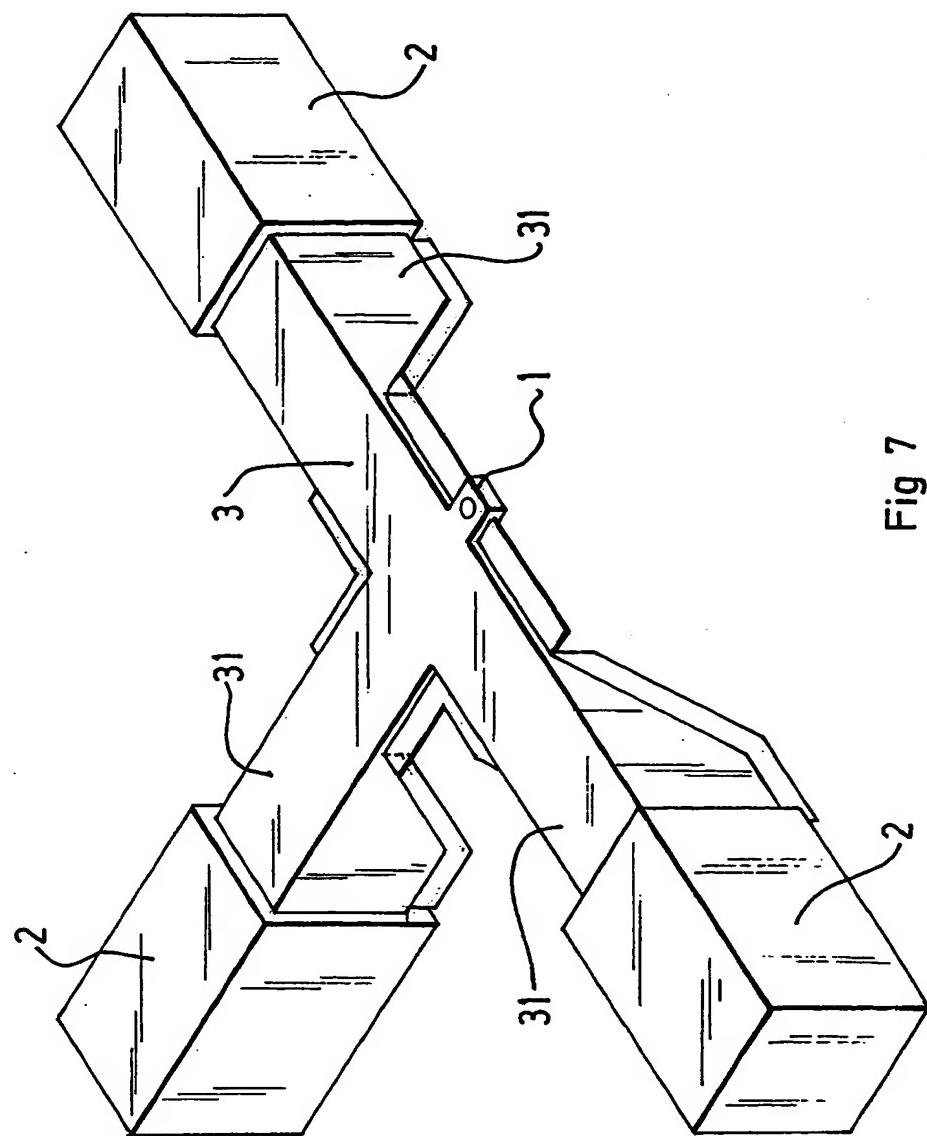


Fig 7

